

## **XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

### **HIDROPIXEL-PLUGIN: DESENVOLVIMENTO, FERRAMENTAS E APLICAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO AO QGIS**

*João Vitor D.S. Lima<sup>1</sup>; Pedro A.M. Silva<sup>2</sup>; Bianca M. Barreiro<sup>3</sup>;*

*Dario M. Lima<sup>4</sup>; Adriano R. Paz<sup>5</sup> & Daniel G. Allasia<sup>6</sup>*

**Abstract:** This paper presents the Hidropixel Plugin, a tool integrated into QGIS that implements the distributed hydrological model Hidropixel-DLR, which is based on DEM pixels. The model simulates the rainfall-runoff transformation in three main steps: estimation of flow travel time (Flow Travel Time module), calculation of excess rainfall using the Curve Number method (Excess Rainfall module), and generation of the hydrograph with attenuation via a linear reservoir per pixel (Flow Routing module). The plugin was developed with a user-friendly graphical interface and includes tools for rainfall data interpolation, input data validation, and generation of hydrographs for user-defined regions of interest, allowing the model to be run directly within the QGIS environment. The case study was conducted in the Tapacurá River basin (PE), utilizing a LiDAR-DTM and flood event data from 2023. The model demonstrated satisfactory performance in simulating flood events, particularly in estimating peak flows. It also enabled detailed analysis of contributions from sub-basins and land use classes. The Hidropixel Plugin proved to be a valuable tool for applied hydrological studies, education, and water resources planning, with strong potential for adoption by professionals and institutions working with GIS and remote sensing data in hydrological applications.

**Resumo:** Este artigo apresenta o Hidropixel Plugin, uma ferramenta integrada ao QGIS que operacionaliza o modelo hidrológico distribuído Hidropixel-DLR, baseado em pixels de MDE. O modelo simula a transformação chuva-vazão em três etapas: cálculo do tempo de viagem do escoamento (módulo Flow Travel Time), determinação da chuva excedente pelo método Curve-Number (módulo Excess Rainfall) e geração do hidrograma com amortecimento via reservatório linear por pixel (módulo Flow Routing). O plugin foi desenvolvido com interface gráfica amigável e ferramentas de interpolação de dados de chuva, validação de dados de entrada e geração de hidrogramas por regiões de interesse do usuário, permitindo sua execução direta no ambiente QGIS. O estudo de caso foi realizado na bacia do rio Tapacurá (PE), utilizando MDT derivado de LiDAR e dados de eventos de cheia ocorridos em 2023. O modelo apresentou desempenho satisfatório na simulação das cheias, especialmente na estimativa da vazão de pico. Também permitiu análises detalhadas das contribuições de sub-bacias e classes de uso do solo. O Hidropixel Plugin mostrou-se uma ferramenta útil para estudos hidrológicos aplicados, ensino e planejamento, com potencial de ser amplamente adotado por profissionais e instituições que utilizam SIGs e dados de sensoriamento remoto em recursos hídricos.

**Palavras-Chave** – Chuva-vazão; Sistema de Informação Geográfica; Simulação hidrológica.

1) Graduando em Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa (PB), (81) 99461-4905, jvds@academico.ufpb.br

2) Graduando em Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa (PB), (83) 3216-7355, pedrodme96@gmail.com

3) Graduanda em Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa (PB), (83) 98210-7134, bmb@academico.ufpb.br

4) Pesquisador na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza (CE), (85) 3101-1088, dario.lima@funceme.br

5) Professor associado da Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa (PB), (83) 3216-7355, adrianorpaz@yahoo.com.br

6) Professor associado da Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria (RS), (55) 3220-8077, dga@ufsm.br

## INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos que simulam a transformação da chuva em vazão constituem a principal ferramenta utilizada para uma série de estudos técnicos de apoio à tomada de decisão envolvendo os recursos hídricos de uma região. Por exemplo, esses modelos são aplicados para estimar a disponibilidade hídrica, analisar o balanço entre ofertas e demandas hídricas, estimar vazões de cheia como suporte a projetos de obras hidráulicas, estimar a resposta da bacia hidrográfica a eventos extremos, gerar informações dentro de um sistema de alerta de inundações e simular cenários diversos, como envolvendo mudanças de uso e cobertura da terra ou mudanças climáticas.

Existe uma gama de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, alguns ditos concentrados e outros distribuídos. Os modelos concentrados consideram a bacia como elemento único, enquanto nos distribuídos a bacia hidrográfica é discretizada em elementos menores, como elementos de uma malha regular ou mini-bacias. Isso aumenta a representação da variabilidade espacial das características físicas e da precipitação (Tucci, 2005).

Um subtipo da modelagem hidrológica distribuída é aquele em que os modelos utilizam os pixels da matriz do Modelo Digital de Elevação (MDE) como forma de discretização espacial. A proposta é aumentar a representação espacial e, geralmente, simplificar a formulação dos processos hidrológicos representados (Cho *et al.*, 2018). A maioria das abordagens trabalha com estimativas de tempo de viagem de cada pixel até o exutório da bacia a partir de produtos derivados do MDE como uma informação chave. Por essas características, esse modelo hidrológico tem grande potencial para se integrar a um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O uso crescente de modelos hidrológicos distribuídos tem se apoiado nas funcionalidades dos SIGs e na maior oferta de dados espaciais, como os de sensoriamento remoto (Coon e Shuai, 2022). O acoplamento mais simples entre modelo e SIG ocorre de forma off-line. Outra abordagem é incorporar funções de SIG na interface do próprio modelo, aproveitando a familiaridade dos usuários e mantendo o código original, embora com funcionalidades limitadas. A terceira opção é integrar o modelo a um SIG consolidado, permitindo acesso completo às ferramentas do SIG e atraindo usuários já habituados a essa plataforma. Contudo, isso exige adaptar o código ao ambiente do SIG, além de demandar aprendizado e manutenção em dois ambientes distintos (Fan e Collischonn, 2013; Khatami e Khazaei, 2014; Molina-Navarro *et al.*, 2018).

Um exemplo de modelo hidrológico distribuído por pixel é o Hidropixel, modelo matemático determinístico, baseado em eventos e que considera cada pixel do MDE uma unidade de resposta hidrológica, apresentado em Veeck *et al.* (2021) e incrementado por Lima *et al.* (2024). Esse modelo incorpora diversos produtos derivados do MDE, estima o tempo de viagem do escoamento de cada pixel até o exutório da bacia, determina chuva excedente a partir do método do Curve-Number (CN) e gera hidrogramas resultantes com dois métodos conforme escolha do usuário: uma adaptação do hidrograma unitário triangular sintético para cada pixel ou um reservatório linear simples por pixel, com tempo de retardo variável função do tempo de viagem do escoamento até o exutório.

Nesse contexto, este artigo apresenta a integração do modelo hidrológico distribuído Hidropixel-DLR (versão Distributed Linear Reservoirs) com o SIG *Quantum GIS* (QGIS), na forma de um *plugin*, chamado Hidropixel Plugin. O QGIS é um software de código aberto que possibilita pesquisadores e desenvolvedores expandirem suas funcionalidades (Guo *et al.*, 2022; Mandal *et al.*, 2025). Esse SIG foi escolhido por ser um sistema *open source*, possuir um código de qualidade funcional e contar com o suporte de uma comunidade ampla e diversificada de desenvolvedores e usuários (Samela *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019). O artigo descreve o desenvolvimento do plugin e

ferramentas principais, que incluem a interpolação espacial de chuva para cada intervalo de tempo de cálculo, checagens de validação e coerência nos dados de entrada e a possibilidade do usuário definir regiões de interesse quaisquer para geração individualizada de hidrogramas. Como estudo de caso, faz-se a aplicação do modelo para a simulação chuva-vazão de dois eventos de cheia ocorridos na bacia hidrográfica do rio Tapacurá, em Pernambuco.

## **METODOLOGIA**

### **Modelo hidrológico Hidropixel**

O Hidropixel-DLR (Lima *et al.*, 2024) é uma versão do modelo Hidropixel desenvolvida para representar o escoamento superficial melhorando a versão anterior, que subestimava o tempo de pico do hidrograma (Costa *et al.*, 2019; Veeck *et al.*, 2021). A transformação da chuva em vazão é calculada segundo três etapas principais: cálculo do tempo de viagem do escoamento até o exutório da bacia ( $T_v$ ), cálculo da precipitação excedente ( $P_{exc}$ ) e geração do hidrograma do escoamento superficial ( $Q_{calc}$ ). Na primeira etapa, o  $T_v$  para cada pixel é obtido via adaptação do método da velocidade, baseado em equações derivadas da fórmula de Manning, com base em produtos derivados do MDE (comprimentos e declividades de caminhos de fluxo), coeficientes de Manning da superfície e do canal e características hidráulicas dos canais. São diferenciados os escoamentos em superfície e em canal.

Na segunda etapa, a  $P_{exc}$  em cada pixel é definida a partir do método CN, baseado nas características do tipo, uso e cobertura do solo (NRCS, 2004). A cada pixel é atribuído um CN específico em função de suas características e calculada a  $P_{exc}$  correspondente discretizada temporalmente segundo o intervalo de tempo de cálculo escolhido ( $dt$ ). Na etapa 3 da versão Hidropixel-DLR, a vazão gerada pela  $P_{exc}$  em cada  $dt$  é transladada até o exutório com base no  $T_v$  do pixel e o hidrograma final desse elemento é atenuado no reservatório linear simples. O reservatório linear simples de cada pixel tem tempo de permanência da água função do  $T_v$  e do parâmetro  $\beta$  (constante para a bacia), que vai de 0 a 1, sendo que próximo a 1 indica domínio dos efeitos de armazenamento e próximo a 0 implica mínimo amortecimento (Lima *et al.*, 2024).

### **Hidropixel Plugin**

#### *Especificações*

O desenvolvimento do plugin utilizou duas linguagens de programação: Python (versão 3.9.5) e Visual Basic .NET, esta última empregando a plataforma .NET Framework da Microsoft. Essa abordagem foi adotada considerando que a versão do modelo Hidropixel-DLR foi originalmente desenvolvida em VB.NET, o que permitiu minimizar erros de adaptação entre linguagens e manter o desempenho computacional durante o processamento. O módulo em Python é responsável por intermediar a interface entre o usuário e o ambiente QGIS: recebe os arquivos de entrada e os parâmetros definidos no Hidropixel Plugin, gerencia a exportação e a exibição dos resultados das simulações. O plugin foi idealizado no QGIS versão 3.28.0 – Firenze, porém, o complemento é compatível com qualquer versão 3.x do SIG. As principais dependências são os pacotes GDAL e Numpy, ambos adicionados ao instalar o QGIS. O Hidropixel Plugin é exclusivo do sistema operacional Windows e é disponibilizado gratuitamente, com arquivo de instalação e manual.

#### *Módulos e interface gráfica*

A interface gráfica do Hidropixel Plugin foi construída no *software* Qt Designer, ferramenta que permite a criação do componente gráfico apenas selecionando e adicionando *Widgets*, os

elementos do *software*. Foi adotada a língua inglesa para a interface visando maior disseminação do modelo por usuários estrangeiros. Baseado na estrutura proposta por Lima *et al.* (2024), o *Hidropixel Plugin* foi dividido em três módulos: *Flow Travel Time* (cálculo do tempo de viagem do escoamento), *Excess Rainfall* (determinação da chuva excedente) e *Flow Routing* (geração do hidrograma resultante), cujas entradas e saídas são especificadas na Tabela 1. O último módulo permite visualizar o hidrograma calculado superposto ao observado, exibindo métricas de performance calculadas nessa comparação de hidrogramas.

Tabela 1 – Arquivos de entrada e saída dos três módulos principais do Hidropixel Plugin.

Módulo	Entradas	Saídas
<i>Flow Travel Time</i>	1. Delimitação da bacia hidrográfica# 2. MDE# 3. Direções de fluxo# 4. Áreas de drenagem acumuladas# 5. Rede de drenagem# 6. Rede de drenagem segmentada# 7. Raio hydr., coef. Manning e decliv. trechos de rios* 8. Uso e cobertura do solo# 9. Coef. Manning e coef. k para classes de uso do solo*	1. Tempo de viagem do escoamento# 2. Declividade ao pixel de jusante# 3. Segmentação dos rios em trechos geometricamente semelhantes# 4. Raio hidráulico, coef. Manning e declividade dos trechos de rios* 5. Área da seção transversal dos rios# 6. Largura da seção trapezoidal do canal#
<i>Excess Rainfall</i>	1. Delimitação da bacia hidrográfica# 2. Curve Number por pixel# 3. Precip. espacialmente distribuída ou chuva média* 4. Quant. e coord. geográficas dos postos de chuva* 5. Hietogramas nos postos de chuva*	1. Numeração dos pixels da bacia# 2. Retenção máxima por pixel (S)# 3. Abstração inicial por pixel (Ia)# 4. Chuva total acumulada por pixel# 5. Chuva excedente acumulada# 6. Hietograma de chuva excedente por pixel*
<i>Flow Routing</i>	1. Delimitação da bacia hidrográfica# 2. Tempo de viagem do escoamento# 3. Hietograma de chuva excedente por pixel* 4. Chuva excedente acumulada# 5. Segmentação da bacia em regiões de interesse#	1. Vazão de pico por pixel# 2. Volume total escoado por pixel# 3. Hidrograma resultante* 4. Hidrogramas por regiões de interesse*

#arquivos raster, GeoTIFF (.tif). \*arquivos de texto (.txt)

### Ferramenta de interpolação de dados de chuva

No módulo *Excess Rainfall* foi desenvolvida uma ferramenta de interpolação espacial de dados de chuva, baseada no método do inverso do quadrado da distância, a partir da informação da quantidade e localização geográfica dos postos com dados disponíveis de chuva. É uma ferramenta opcional ao usuário, que pode preferir alimentar o modelo diretamente com a chuva espacialmente distribuída sobre a bacia ao longo do tempo, determinada via qualquer outro método ou ferramenta computacional.

### Ferramenta de validação de dados de entrada

A criação de interfaces gráficas e a integração a um SIG facilitam e agilizam a aplicação de um modelo hidrológico, mas tendem a induzir o usuário a realizar as operações de forma apressada, sem necessariamente ter um embasamento teórico adequado e com conferências mínimas de valores. Para mitigar esse risco, foram implementadas rotinas de verificação dos dados de entrada nos três módulos do plugin (Tabela 2). Por exemplo, o raster de direções de fluxo é validado quanto à conformidade com as oito direções possíveis e se há conectividade de fluxo de cada pixel pertencente à bacia até o exutório, que é identificado automaticamente como o pixel de maior área acumulada de drenagem dentro da delimitação da bacia. O usuário precisa realizar todas as checagens como condição obrigatória para rodar cada módulo. Diversos casos de não atendimento às exigências dos dados foram previstos, resultando em mensagens de alerta ao usuário.

Tabela 2 – Checagens de validação e coerência de dados desenvolvidas no Hidropixel Plugin.

Módulo	Checagens
Flow Travel Time	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de MDE (valores válidos dentro da bacia)</li> <li>4. Codificação das direções de fluxo: 8 valores distintos, inteiros e positivos</li> <li>5. Conteúdo do arquivo raster de direções de fluxo: valores segundo a codificação e todos os caminhos de fluxo a jusante de cada pixel alcançam o exutório da bacia</li> <li>6. Conteúdo do arquivo raster de rede de drenagem: 1 (rede) ou 0 (não-rede) e caminho contínuo a jusante cada pixel da rede até exutório</li> <li>7. Conteúdo do arquivo raster de segmentos da rede: 1 a Ns (pixels da rede), 0 (demais), onde Ns é a quantidade de segmentos, com valores inteiros</li> <li>8. Conteúdo do arquivo raster de classes de uso e ocupação do solo: pixels da bacia com valores inteiros positivos</li> <li>9. Conteúdo do arquivo raster de áreas acumuladas de drenagem: valores reais positivos para pixels da bacia, sendo crescentes para jusante de cada caminho de fluxo</li> </ol>
Excess Rainfall	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de CN (valores positivos e <math>\leq 100</math> dentro da bacia)</li> </ol>
Flow Routing	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abrangência e discretização espacial dos rasters de entrada</li> <li>2. Conteúdo do arquivo raster de delimitação da bacia (1 dentro da bacia; 0 fora)</li> <li>3. Conteúdo do arquivo raster de tempos de viagem do escoamento: valores reais positivos para pixels da bacia, sendo crescentes para jusante ao longo de cada caminho de fluxo</li> <li>4. Conteúdo do arquivo raster de chuva excedente total por pixel: valores reais positivos ou nulos para pixel dentro da bacia</li> <li>5. Conteúdo do arquivo de hietogramas de chuva excedente por pixel: valores reais positivos ou nulos para todos os pixels da bacia ao longo do tempo</li> <li>6. Conteúdo do arquivo raster de regiões de interesse do usuário: valores inteiros positivos ou nulos dentro da bacia</li> </ol>

### Geração de hidrogramas por áreas de interesse

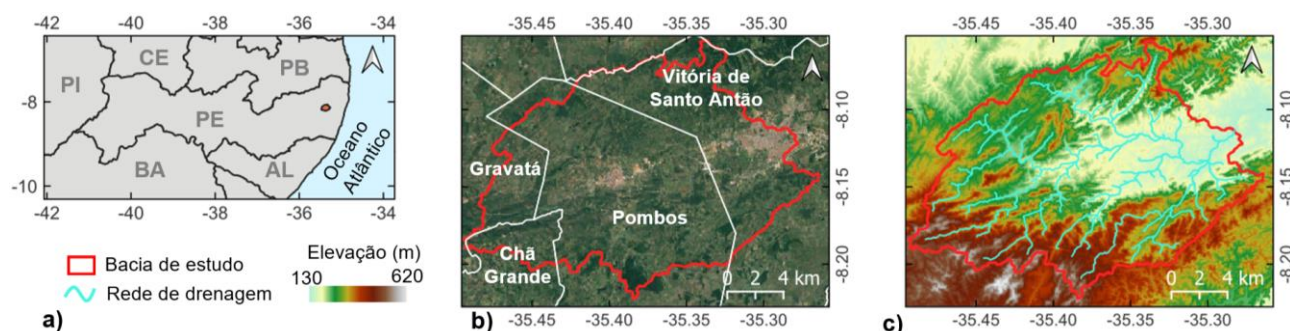
Esta ferramenta possibilita ao usuário definir regiões de interesse para gerar hidrogramas separados e individualizados por cada região. Essa possibilidade advém do fato de o Hidropixel considerar cada pixel da matriz uma unidade de resposta hidrológica (Lima *et al.*, 2024), cujo cômputo de tempo de viagem do escoamento, chuva excedente e geração de escoamento é independente dos demais. Com base na definição de regiões de interesse, a ferramenta superpõe temporalmente os hidrogramas de todos os pixels pertencentes a cada região e retorna ao usuário o hidrograma específico para cada uma delas.

### Estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Tapacurá

#### Localização e caracterização básica

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Tapacurá, delimitada até o posto fluviométrico Vitória de Santo Antão (código 39170000), com área de drenagem de 262 km<sup>2</sup>. Essa bacia abrange parcialmente os municípios de Gravatá, Chã Grande, Pombos e Vitória de Santo Antão e tem histórico de cheias com muitos prejuízos. Segundo dados do projeto MapBiomias (Souza *et al.*, 2020) de 2022, a bacia em estudo é ocupada majoritariamente por áreas de pastagem ou agrícolas, que representam 82,7% da área. As áreas urbanas representam 5,7% e áreas de mata/floresta ocupam 11,4%.

Figura 1 - Localização da área de estudo com indicação dos municípios abrangidos, rede de drenagem e MDE.



### Processamento de dados para a simulação hidrológica

O MDE considerado no estudo foi elaborado a partir dos dados de Modelo Digital de Terreno (MDT) disponibilizados pelo projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D; Cirilo *et al.*, 2014). Esse projeto realizou levantamento topográfico via escaneamento a laser do tipo LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e disponibiliza, dentre outros produtos, MDT com resolução espacial de 1 m. Esse MDT foi reamostrado para resolução espacial de 30 m e processado para remoção de depressões via algoritmo PFS (*Priority First Search*) e atribuição de direções de fluxo pelo método D8 (*Deterministic Eight-Neighbours*). Seguindo os caminhos de fluxo estabelecidos pelas direções de fluxo, obteve-se a matriz de áreas acumuladas de drenagem. Considerou-se um limiar de área de drenagem mínima de 1 km<sup>2</sup> para denotar o início da rede de drenagem, a partir de análises visuais sobre imagens de satélite. Pela ausência de dados de seções transversais, extraiu-se um conjunto de seções transversais a partir do MDT 1 m e estimou-se larguras e áreas considerando seções transversais trapezoidais. Foram ajustadas curvas que relacionam área e largura da seção com a área de drenagem, utilizadas para estimar essas características hidráulicas para demais trechos de rio.

Dados do MapBiomass (Souza *et al.*, 2020), do ano 2022 foram processados para agrupar as classes de uso e ocupação da terra em apenas quatro categorias: pastagem/agricultura; mata; áreas urbanas; água. Os tipos de solos foram avaliados conforme Sartori *et al.* (2005) para classificação em grupos hidrológicos do método NRCS-CN. Os valores iniciais de CN correspondentes ao valor lambda 0,2 foram obtidos de NRCS (2004), sendo convertidos para valores referentes a lambda 0,05, conforme Hawkins *et al.* (2009). Esses valores de CN foram depois ajustados no processo de calibração. Os valores de coeficiente de rugosidade de Manning e o fator k foram obtidos de NRCS (2004), Manual de Drenagem de Porto Alegre (IPH, 2005) e Lima (2021).

Dois eventos foram trabalhados neste estudo, ocorridos em junho/2023 e julho/2023, com dados disponíveis de chuva em três estações e dados de vazão. Na estação Vitória de Santo Antão-ANA (39170000) os dados de chuva e vazão tem passo de tempo de 15 minutos, enquanto nas estações Pombos-CEMADEN (261130901A) e Vitória de Santo Antão-CEMADEN (261640702A) o passo de tempo dos dados de chuva é de 10 min. Os dados dessas duas estações foram convertidos para intervalos de 15 min fazendo-se a conversão de cada três registros de 10 min ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) em dois registros de 15 min ( $y_1$ ,  $y_2$ ), fazendo  $y_1 = x_1 + x_2/2$  e  $y_2 = x_2/2 + x_3$ . O evento de junho/2023 durou 33,5 horas e teve um total acumulado de precipitação variando entre 117 e 150 mm dentre as estações, enquanto o evento de julho/2023 acumulou entre 55 e 66 mm em 23,5 horas. À vazão observada foi aplicado o filtro de Eckhardt seguindo Collischonn, Fan (2013), para separar o hidrograma superficial e o de base, sendo usado o primeiro para comparação com as vazões calculadas pelo modelo.

## Calibração do modelo

A calibração considerou dois parâmetros: CN e  $\beta$ . Para o CN, fez-se o procedimento de Lima *et al.* (2024), usando equações apresentadas em Chow, Maidment, Mays (1988) para determinar os valores correspondentes à combinação entre CN e grupo hidrológico de solo para as condições de umidade I e III. Dividiu-se em 12 faixas o intervalo de variação do CN entre condição I e III, que são as possibilidades de valores a assumir para o parâmetro. Essa faixa de condição de umidade e o parâmetro  $\beta$  foram definidas por calibração manual, tentativa e erro, considerando o ajuste visual de hidrogramas e priorizando a vazão de pico.

## Definição de regiões de interesse para análise das vazões

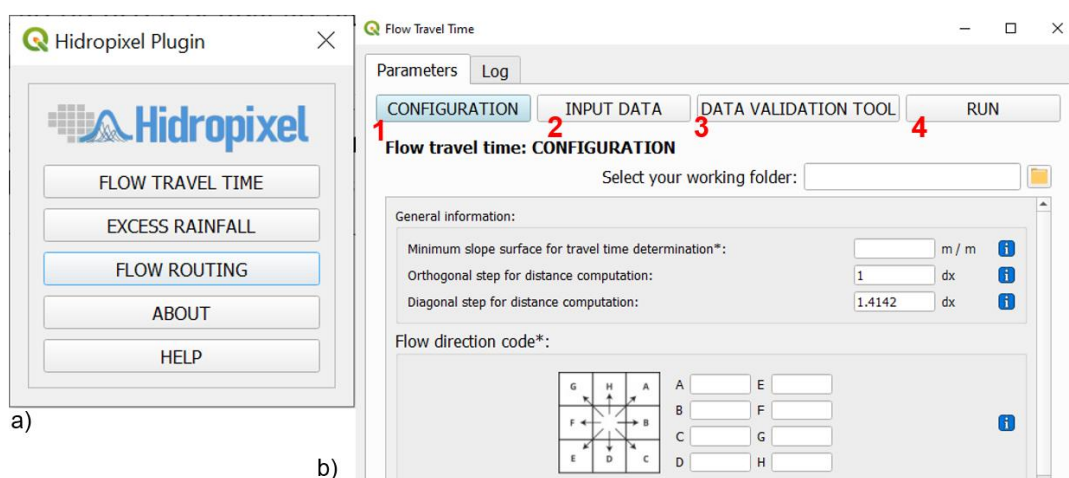
Foram feitas duas simulações para exemplificar a análise de vazões geradas por regiões de interesse definidas por duas regras diferentes: i) classificação de uso e ocupação da terra, considerando as quatro classes (mata, agricultura/pastagem, urbana, água); ii) a divisão em 11 sub-bacias, estabelecidas segundo as confluências dos cursos d'água principais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Módulo tempo de viagem do escoamento

O Hidropixel Plugin fica disponível após instalação como um item do menu Complementos do QGIS, tendo como tela inicial a mostrada na Figura 2-a. A Figura 2-b ilustra como são as interfaces dos módulos, tomando como exemplo o *Flow Travel Time*. Para cada módulo, são quatro abas: i) a aba *Configuration* permite ao usuário configurar definições, parâmetros e dados básicos; ii) a aba *Input Data* serve para indicar os arquivos de entrada; iii) a aba *Data Validation Tool* reúne as ferramentas de checagens de dados do módulo; iv) a aba *Run* permite indicar quais são os arquivos de saída e se deseja fazer a visualização automática no QGIS.

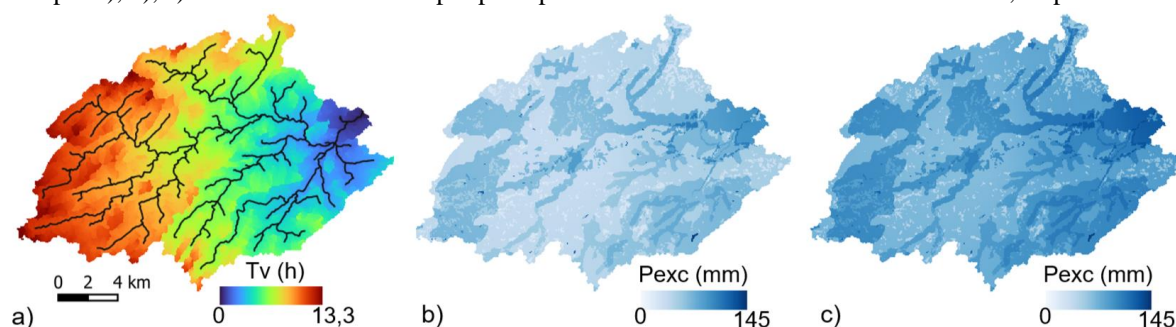
Figura 2 – a) Interface principal do Hidropixel Plugin; b) Interface do módulo Flow Travel Time.



O tempo de viagem do escoamento até o exutório da bacia calculado para cada pixel indica que as áreas mais distantes contribuem com escoamento depois de 13 h da geração do escoamento (Figura 3-a). Essas áreas estão mais a oeste da bacia. O padrão espacial formado ilustra como mais ou menos a metade leste da bacia tem tempos de viagens inferiores a 6 h. Essas estimativas são

influenciadas pelas distâncias e declividades de caminhos de fluxo na superfície e nos canais, pela rugosidade das classes de uso e ocupação do solo e pelas características hidráulicas e rugosidade adotadas para os canais. A análise mais aprofundada desse padrão foge ao escopo deste trabalho.

Figura 3 – a) Tempo de viagem do escoamento de cada pixel até exutório ( $T_v$ ), com superposição da rede de drenagem (linha preta); b), c) Chuva excedente total por pixel para os eventos de Junho/2023 e Julho/2023, respectivamente.



### Módulo chuva excedente

A faixa de condição de umidade antecedente ajustada na calibração para o evento chuvoso de Junho/2023 foi a faixa 7, que é a mais próxima representante da condição clássica intermediária II do método CN. Para o evento de Julho/2023, a faixa ajustada foi a 13, que é a correspondente à condição clássica III, de maior umidade, do método CN. Por esse motivo, há maior geração de escoamento no evento de Julho/2023, mas os padrões espaciais são os mesmos do outro evento, já que estão atrelados à distribuição espacial da combinação entre grupo hidrológico do solo e uso e ocupação do solo (Figura 3-b e Figura 3-c). Nos dois eventos, a  $P_{exc}$  máxima alcança 144 mm, correspondente à classe água, cujo valor de CN fica sempre 100 independente da faixa de calibração de umidade. No evento Junho/2023,  $P_{exc}$  teve mínima de 21,1 mm e média de 54,8 mm, enquanto o evento de Julho teve mínima e média de 42,6 e 85,0 mm, respectivamente.

### Módulo geração de escoamento

Os hidrogramas observados e calculados para os dois eventos simulados indicam qualidade satisfatória do ajuste do modelo. Destaca-se o acerto na vazão de pico, que foi o foco da calibração, com erro relativo de até 1% (Figura 4). O evento de junho/2023, quando analisado separado por regiões de interesse consideradas como as sub-bacias (Figura 5-a), indica como cada uma dessas áreas contribui para o escoamento resultante no exutório da bacia. Como a referência é o exutório da bacia, as sub-bacias 1, 2 e 4 são as que contribuem com vazões de pico mais defasadas no tempo, em virtude do maior tempo de viagem do escoamento (21 a 23 h). Já as sub-bacias mais próximas ao exutório geram vazões de pico mais rapidamente (11 a 13 h). Também se destaca que a sub-bacia 9, embora de mesmo tamanho ou inferior às sub-bacias 1, 5, e 7 e minimamente ocupada por área urbana, tem vazão de pico muito superior às demais. Isso é explicado pela geomorfologia, com o perfil longitudinal tendo declividades muito maiores do que as demais. A análise de hidrogramas separados por classes de uso e ocupação (Figura 5-b) ilustra o uso da ferramenta para reunir as respostas da bacia segundo áreas que não estão contíguas espacialmente. Nesse caso, a classe de pastagem/agricultura tem vazões muito superiores devido à maior área ocupada.

Figura 4 – Hidrogramas observados e calculados para eventos de Junho/2023 (a) e Julho/2023 (b).

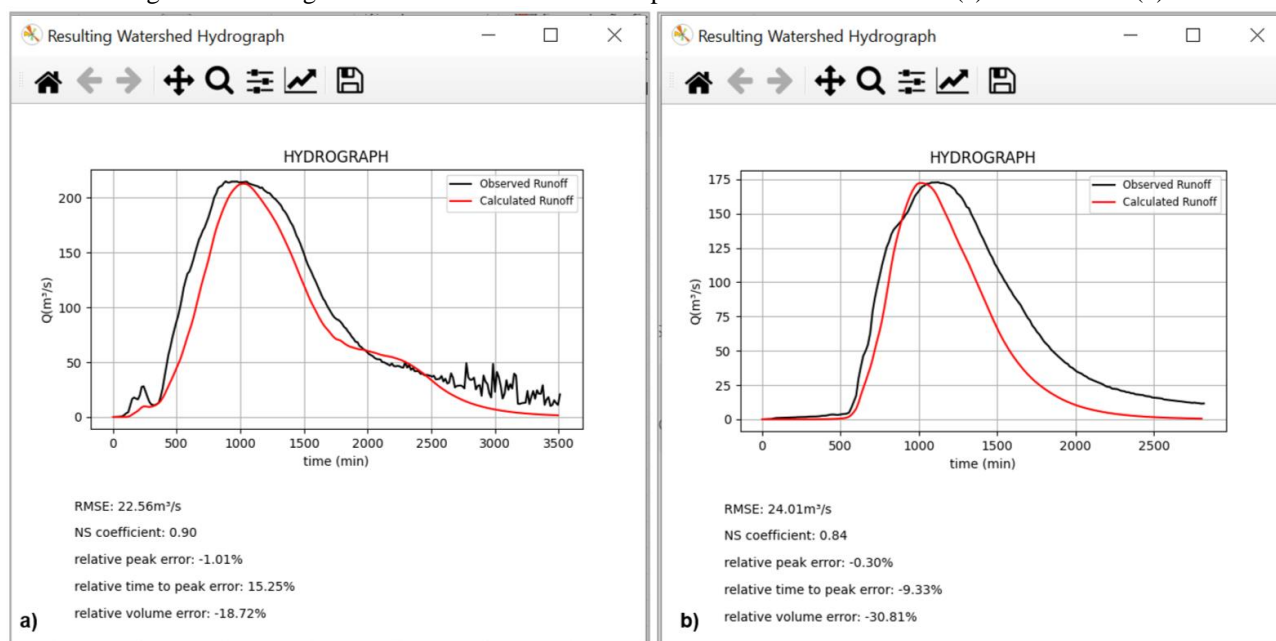
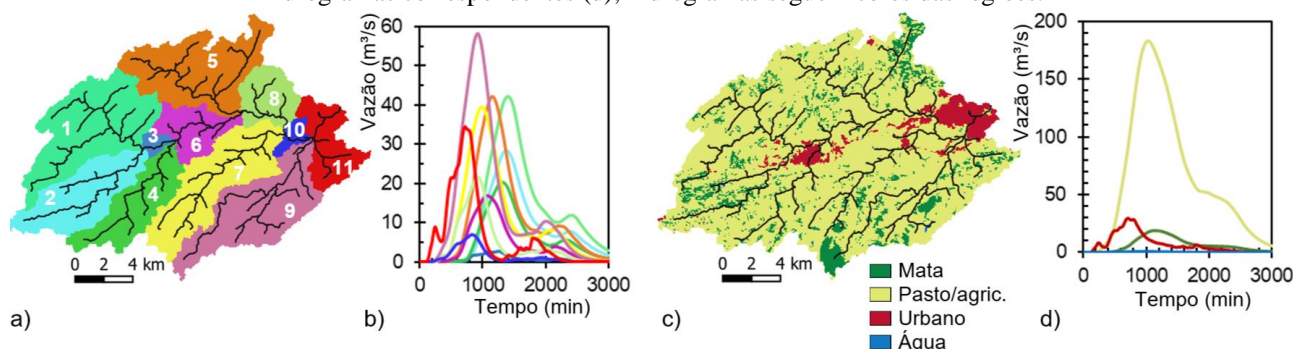


Figura 5 - Divisão em 11 sub-bacias (a) e hidrogramas correspondentes (b); classes de uso e ocupação do solo (c) e hidrogramas correspondentes (d); hidrogramas seguem cores das regiões.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Hidropixel Plugin representa um avanço relevante na integração entre modelagem hidrológica distribuída e geotecnologias, ao operacionalizar, dentro do ambiente QGIS, o modelo Hidropixel-DLR. Essa iniciativa torna mais acessível o uso de modelos baseados em pixels de MDE por meio de interface gráfica amigável, validações automatizadas e modularidade bem definida. A aplicação em eventos reais demonstrou a capacidade do plugin de simular com precisão a dinâmica hidrológica da bacia do Tapacurá, especialmente na estimativa da vazão de pico. A ferramenta de geração de hidrogramas por regiões de interesse provou-se de grande potencial para gerar análises diferenciadas e encontrar padrões de geração de escoamento com enfoques distintos dos possíveis tradicionalmente por modelos hidrológicos distribuídos.

As funcionalidades do plugin desenvolvido, a natureza simplificada do modelo hidrológico, com requisitos de dados usualmente disponíveis e poucos parâmetros calibráveis e as ferramentas disponíveis no QGIS tornam o Hidropixel Plugin uma ferramenta com grande potencial para uso em atividades de ensino, profissional e de pesquisa científica.

## REFERÊNCIAS

- CHO, Y.; ENGEL, B.A.; MERWADE, V.M. “*A spatially distributed Clark’s unit hydrograph based hybrid hydrologic model (Distributed-Clark)*”. *Hydrological Sciences Journal* 63, 1519–1539, 2018.
- CIRILO, J.A. et al. “*Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial*”. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7 (4), 2014.
- COON, E.T.; SHUALI, P. “*Watershed Workflow: A toolset for parameterizing data-intensive, integrated hydrologic models*”. *Environmental Modelling & Software* 157, 105502, 2022.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. “*Defining parameters for Eckhard’s digital baseflow filter*”. *Hydrological Processes*, 27, 2614–2622, 2013.
- COSTA, F.F.; PAZ, A.R.; PICCILLI, D.A. “*Modified NRCS-CN-TUH methods for distributed rainfall-runoff modeling*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24, 2019.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. “*Applied Hydrology*”. New York: [s.n.], 1988.
- FAN, F.; COLLISCHONN, W. “*Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19, 1, 243–254, 2014.
- GUO, Z. et al. “*FSLAM: A QGIS plugin for fast regional susceptibility assessment of rainfall-induced landslides*”. *Environmental Modelling & Software* 150, 105354, 2022.
- HAWKINS, R.H. et al. “*Curve number hydrology: State of the practice*”. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2009.
- KHATAMI, S.; KHAZAEI, B. “*Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary*”. *VATTEN – Journal of Water Management and Research* 70, 41-50, 2014.
- IPH, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, “*Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre – Manual de Drenagem Urbana*”, Porto Alegre: IPH/UFRGS, 223 p., 2005.
- LIMA, D.M. “*Abordagens distribuídas para simulação do escoamento superficial baseadas no modelo digital de elevação*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – UFPB, João Pessoa, 2021.
- LIMA, D.; PAZ, A.; XUAN, Y.; ALLASIA, D. “*Incorporating spatial variability in surface runoff modeling with new DEM-based distributed approaches*”. *Computational Geosciences* 28, 1331–1348, 2024.
- NRCS. National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology Disponível em: <<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?c>>. Acesso jun 2025.
- MANDAL, S., NUNCHHANI, V., BANDYOPADHYAY, A. et al. “*Development of QGIS plugin for flood inundation mapping: applying Otsu’s thresholding technique*”. *Sustain. Water Resour. Manag.* **11**, 7 (2025).
- MOLINA-NAVARRO, E.; NIELSEN, A.; TROLLE, D. “*A QGIS plugin to tailor SWAT watershed delineations to lake and reservoir waterbodies*”. *Environmental Modelling & Software* 108, 67–71, 2018.
- PARK, S. et al. “*A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models*”. *Environmental Modelling & Software* 11, 493–497, 2019.
- SAMELA, C. et al. “*A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas*”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70, 43–52, 2018.
- SARTORI, A.; LOMBARDI, F.; GENOVEZ, A. “*Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 10, 4, 2005.
- SOUZA, C.M. et al. “*Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine*”. *Remote Sensing* 12, 2020.
- VEECK, S.; COSTA, F.F.; LIMA, D.L.; PAZ, A.R.; ALLASIA, D.P. “*Scale dynamics of the HIDROPIXEL high-resolution DEM-based distributed hydrologic modeling approach*”. *Environmental Modelling & Software* 127, 104695, 2021.
- TUCCI, C.E. “*Modelos Hidrológicos*”. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.